

На правах рукописи

Максимюк Владимир Сильвестрович

**НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ
В ЗАДАЧЕ ВИДЕНИЯ**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2007

Работа выполнена в Федеральном Государственном унитарном
предприятии «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики»»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор
Филиппов Вадим Львович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Москаленко Николай Иванович

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Непогодин Иосиф Андреевич

Ведущая организация: Томский Государственный университет
им. В.В.Куйбышева

Защита диссертации состоится 8 ноября 2007 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете им. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18, физический факультет, ауд.210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан 5 октября 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18
д.ф.-м. н., профессор



А.В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность. Известно, что аэрозоль – это основной компонент атмосферы, которым определяется пространственная и временная динамика её оптических свойств, и в том числе аэрозольного помутнения. Мерой оценки аэрозольного помутнения приземного слоя атмосферы является метеорологическая оптическая дальность, которая регулярно регистрируется специализированной сетью наземных наблюдательных пунктов. Вместе с тем, для решения задач видения на наклонных оптических трассах и задачах в области совершенствования методов прогноза погоды, климата, экологии, необходимо знание закономерностей вертикальной стратификации аэрозоля вне приземного слоя – в тропосфере. В данной работе исследуется наклонная прозрачность в тропосфере как составная часть в системе характеристик видения «объект-фон-атмосфера-прибор наблюдения».

Как отмечается в целом ряде монографий (Розенберга Г.В., Зуева В.Е., Ивлева Л.С., Филиппова В.Л.), для изучения закономерностей формирования макромасштабных метеорологических и оптических величин в воздушной массе с внутренней слоистой структурой стратификации атмосферного аэрозоля необходима постановка специальных оптико-геофизических исследований характеристик тропосферы, как элементов оптической погоды. Отечественные работы данного плана были поставлены в ИФА РАН, ФГУП «НПО ГИПО», ИОА СО РАН, АФИ НАН Казахстана. Первые систематизированные и регулярные комплексные оптико-геофизические исследования в широкой области длин волн были начаты Филипповым В.Л. под руководством Розенберга Г.В. на Звенигородской научной базе ИФА РАН в конце 60-х годов, а затем продолжены Филипповым В.Л., Макаровым А.С., Ивановым В.П. в Казани и других климатических зонах с учетом синоптического фактора оптической погоды. Одной из важнейших составляющих этого цикла работ, как специализированной программы «Тропосфера», стали нефелометрические и лидарные исследования с борта самолета-лаборатории, проведенные автором совместно с Татьяниным С.В. и Танташевым М.В. Подобные же работы широко развернуты в Восточной Сибири с использованием как стационарных, так и мобильных лидаров, нефелометров, аэрозольных счетчиков сотрудниками ИОА СО РАН (Томск) Панченко М.В., Матвиенко Г.Г., Гришиным А.И., Беланом Б.Д. и др. Однако в данных работах не решены проблемы повышенной точности, чувствительности измерений и селективности к фоновой засветке. Регулярные исследования аэрозоля спектро-нефелометрическими и поляризационными методами выполнялись сотрудниками ИФА РАН (Москва) Горчаковым Г.И., Свириденковым М.В., Сидоровым В.Н., Исаковым А.А. и др., однако только для приземного слоя. Многоплановые исследования аэрозоля проводились в АФИ и ПИ (Алма-Ата) Пясковской-Фесенковой Е.В., Тороповой Т.П., Токаревым О.Д., в ИПГ (Москва) Смеркаловым В.А. в ИЭМ (Обнинск) Ковалевым А.Ф. и др. для оптической толщи атмосферы и

приземного слоя. Известен ряд зарубежных работ по исследованию тропосферы, в числе которых – самолетные исследования характеристик аэрозоля в Европе по программе OPAQUE (Optical Atmospheric Quantities in Europe), выполненные с помощью модифицированного интегрального нефелометра. Их основные результаты отражены в работах Duntley S.Q., Johnson R.W., Gordon J.I., Charlson R.J. Эти результаты выделены и обобщены группой авторов (Fenn R.W., Shettle E.P., Johnson R.W.) в виде известной климатической модели высотного профиля аэрозоля. Данная модель широко применяется, в том числе, в структуре современной версии пакета расчетных программ Modtran. К числу недостатков данной модели относится априорно принятое постоянство (статичность) высоты планетарного пограничного слоя (ППС) $h_2 = 2$ км в различных климатических условиях её применения для баротропной атмосферы. В отечественных разработках изменчивость высоты h_2 по рекомендациям Дябина Ю.П. (ФГУП «НПО ГИПО») и Панченко М.В. (ИОА СО РАН) параметризуется по средней температуре ППС в масштабе сезонных градаций и внутри сезонных градаций. Исходя из указанных выше работ, к настоящему времени не решена проблема параметризации оптических характеристик ППС в дневное время суток в масштабе краткосрочного прогноза.

Путь решения актуальной задачи, предложенный автором, состоит в более точной диагностике вертикального профиля объёмного показателя аэрозольного светорассеяния и производных величин: концентрации и дисперсного состава фоновое аэрозоля, наклонной прозрачности слоя тропосферы, с учетом синоптического фактора и с помощью нового комплекса разработанной нефелометрической аппаратуры высокой чувствительности и самолетного базирования. Введение дополнительных признаков для характеристики бароклинной атмосферы позволяет получить более точные оценки прогноза наклонной прозрачности с учетом изменения структуры барического поля и поля температуры теплых и холодных воздушных масс. Задействованный комплекс взаимодополняющих технических средств, состоящий из нефелометра и лидара, позволяет наиболее точно и достоверно выполнить важные для практики оптико-физические прямые исследования *in situ* оптических характеристик реальной атмосферы с минимумом априорных допущений, с учётом динамики атмосферных процессов в естественном синоптическом цикле смены погоды, над однородной и неоднородной подстилающей поверхностью.

Основой измерительного комплекса является аттестованный самолетный спектральный нефелометр с углом наблюдения 45° , специальной проточной конструкции с измерительным объёмом открытого типа. В оптимизированной схеме прибора получен предельно высокий энергетический потенциал, который и определил его основную фотометрическую характеристику – чувствительность, которая в 10...100 раз превышает чувствительность обычных приборов данного назначения. Достигнутые характеристики чувствительности и контраста прибора позволяют реализовать досто-

верные аэрозольные измерения в широком динамическом диапазоне концентраций в дневное время суток и в том числе, для условий предельно «чистого» воздуха в слое средней тропосферы.

В развитии нефелометрии необходимо особо отметить фундаментальную роль и значение работы Бартеневой О.Д. (Труды ГГО 1967, вып. 220), где систематизированы индикатрисы рассеяния приземного слоя и впервые развит нефелометрический метод анализа прозрачности атмосферы под углом наблюдения 45° (далее – метод 45°). Результаты данной работы часто привлекаются отечественными и зарубежными исследователями для сравнительного анализа и верификации своих результатов и новых эмпирических данных. Они послужили, в том числе, эмпирической базой и методической основой для постановки и проведения комплексного международного проекта США и ряда стран Европы в программе «OPRQUE» по самолетному исследованию индикатрис аэрозольного светорассеяния тропосферы, вертикальной стратификации тропосферного аэрозоля с борта самолета-лаборатории.

Конструкция атмосферного нефелометра по методу 45° впервые эвристически предложена и разработана в 1940 году сотрудником ГОИ Н.Э. Ритынем, который провел успешные испытания прибора в летний период 1942 года. Данный прибор, по сути, является прямым аналогом всех последующих конструкций данного типа, развитого в современных работах В.Н. Аднашкина, В.Г. Монастырского, Н.В. Гончарова, В.Н. Сидорова и др. В то же время за рубежом большое распространение получила конструкция нефелометра интегрального типа. Она впервые описана Waldram J.M. (1945 г.) и развита в работах Beuttell R.G., Brewer A.M. (1949), Duntley S.Q. (1958), Ahlquist N.C. (1967), Charlson R.J. (1977). Спектральный вариант нефелометрического метода измерений 45° реализован для узкой области спектра (0,42-0,61 мкм) в самолетной конструкции прибора ФАН (ИОА) и в наземной конструкции ультрафиолетового СНУ(0,25-0,58 мкм) и инфракрасного СНИ (0,44-0,85 мкм) нефелометров (ИФА) как приборов закрытого типа, что сопряжено с погрешностями аспирации.

В отличие от предыдущих разработок, в настоящей работе впервые реализован самолётный вариант нефелометра 45° открытого типа и свободного от погрешности аспирации, высокой чувствительности и селективности с одновременным охватом более широкой области спектра (0,38-1,02 мкм), что рассматривается как необходимое условие для более точного анализа характеристик атмосферы в спектральной области работы телевизионных систем наблюдения ($\lambda \sim 1$ мкм) и расчета показателя Ангстрема из результатов спектро-нефелометрических аэрозольных измерений средней и нижней тропосферы в дневное время суток.

Цель работы

Целью работы является повышение точности прогноза и количественной оценки спектральной прозрачности атмосферы в задаче видения наземных объектов для наклонных трасс визирования в условиях слоисто-однородной стратификации тропосферного аэрозоля в дневное время суток.

Основные задачи диссертационной работы

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести самолетные нефелометрические исследования высотного профиля объёмного показателя аэрозольного светорассеяния тропосферы $\mu_a(h, \lambda)$ в различных погодных условиях и географических районах над однородной поверхностью (суша) и неоднородной поверхностью (море-суша, город-пригород), на основе специально разработанной нефелометрической аппаратуры.

2. Провести анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований в форме динамической модели (схемы) краткосрочного прогноза структуры вертикального профиля показателя аэрозольного рассеяния (ослабления) атмосферы.

3. На основе предложенной динамической модели разработать инженерную методику расчета краткосрочного прогноза наклонной прозрачности атмосферы с повышенной точностью результатов.

Научная новизна работы заключается в том, что автором:

- впервые разработана конструкция атмосферного нефелометра 45° для широкой спектральной области измерений ($0,38 \dots 1,02$ мкм) с высокой и ранее недостижимой чувствительностью анализа (10^{-5} км $^{-1}$);

- для монохромного метода нефелометрических измерений $\varphi_0=45^\circ$ на опорной длине волны $\lambda_0=0,5$ мкм, предложено теоретическое обоснование его применимости в широком спектральном диапазоне длин волн ($0,38 \dots 1,02$ мкм). Это решение получено на основе анализа знакопеременного градиента нормированной индикатрисы рассеяния $g(\varphi)$ по параметру $\rho=2\pi a/\lambda$ в функции угла рассеяния φ . Консервативное свойство нулевого градиента $g(\varphi)$ в области $\rho \leq 5$, является основой метода спектральной нефелометрии, а также инвариантом относительно двух переменных величин – радиуса частиц аэрозоля a и волнового числа $1/\lambda$;

- для спектрально-нефелометрического метода 45° предложена методика обработки аналитического сигнала в многопоточном приближении, а также со спектральной коррекцией нормированной индикатрисы рассеяния $g(\varphi_0, \lambda_0)=0.12$ в виде его переменного значения как функция $1/\lambda^{0.2}$;

- для индикатрисы аэрозольного светорассеяния проведен расчет угловой зависимости показателя Ангстрема. Предложена физическая интерпре-

тация эффекта спектральной селективности рассеянного излучения на элементарных центрах рассеяния для некогерентного источника излучения как результат когерентных взаимодействий парциальных волн с учетом фазы. На этой основе сформулированы предложения для адекватной интерпретации результатов нефелометрических измерений с различными углами анализа 45° , 0° и $5 \dots 175^\circ$;

- предложена модификация коэффициентов формулы Ангстрема ($\sim n_1 \lambda^{-n_2}$), для которой установлена эмпирическая связь параметров n_1 и n_2 в виде универсальной функции $n_1 = \exp(-0,7 n_2)$, не зависящей от используемого углового метода анализа ($\varphi = 45^\circ$, или $\varphi = 0^\circ$);

- установлены эмпирические коэффициенты уравнения линейной регрессии, для краткосрочного прогноза высоты аэрозольного ППС в дневное время суток, как производную от термических характеристик приземного слоя и динамических (циркуляционных) характеристик слоя свободной атмосферы;

- экспериментально подтверждено, что микрофизическая структура субмикронного аэрозоля является консервативной характеристикой воздушной массы для слоя нижней и средней тропосферы при существенном изменении концентрации аэрозольной субстанции с высотой. Предложено использовать эту особенность в методике прямой экстраполяции приземных данных о показателе Ангстрема на разные высоты нижней и средней тропосферы.

Практическая значимость состоит в том, что:

- разработаны и реализованы способы увеличения энергетического потенциала нефелометра, его чувствительности, точности, фотометрического контраста измерений, предложено развитие метода спектрально-нефелометрического анализа микрофизических свойств аэрозольного компонента атмосферы, которые могут быть использованы как аналитические при разработке новых средств контроля концентрации и дисперсного состава субмикронной фракции атмосферного аэрозоля;

- установлены эмпирические зависимости толщины пограничного слоя (ППС) от термодинамических характеристик атмосферы, как необходимой составляющей динамической модели вертикального профиля аэрозоля в задаче прогноза его параметров с повышенной точностью и пространственным разрешением в условиях слоисто-однородной структуры бароклинной атмосферы. Эти результаты могут быть использованы при построении уточнённой оптико-метеорологической модели атмосферы, а также региональных динамических моделей, учитывающих тонкую структуру динамики высоты пограничного слоя;

- результаты диссертационной работы использованы в проектно-конструкторской деятельности ФГУП «НПО ГИПО» в виде экспериментальных данных контроля и моделирования наклонной прозрачности атмо-

сферы. Использование указанных результатов позволило повысить качество, и сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ при разработке оптико-электронных систем.

На защиту выносятся:

1. Самолетный спектральный измерительный комплекс для определения следующих величин:

- объёмного показателя аэрозольного рассеяния $\mu_a(\lambda_0=0,54 \text{ мкм})$ в диапазоне от 0,00015 до 3 км^{-1} с относительной погрешностью менее $\pm 15\%$;

- объёмного спектрального показателя аэрозольного рассеяния $\mu_a(\lambda)$ на 5 длинах волн в области $\lambda=0,38\text{-}1,02 \text{ мкм}$, с относительной погрешностью менее 15%. При этом показано, что спектральный ход $\mu_a(\lambda)$ в указанном диапазоне длин волн следует модифицированной формуле Ангстрема:

$\mu_a(\lambda) = \mu_a(\lambda_0) n_1 \lambda^{-n_2}$, где $n_1 = \exp(-0,7n_2)$ – эмпирическая функция, $\delta n_1 = \pm 5\%$;

- показатель Ангстрема $n_2(45^\circ)$, определенный по нефелометрическому методу анализа $\varphi=45^\circ$, находится в диапазоне от 0 до 4 с абсолютной погрешностью измерений $\delta n_2 = 0,30$. Показатель Ангстрема $n_2(0^\circ)$, определённый по методу прозрачности $\varphi \approx 0^\circ$, находится в диапазоне от 0 до 2;

- показатель обратного рассеяния атмосферы β_a на длине волны 0,69 мкм, регистрируемый лидаром в направлении визирования вертикально вниз определён в относительных единицах на удалениях $h < 3 \text{ км}$, с погрешностью $\delta h = 0,1 \text{ км}$.

2. Результаты экспериментальных исследований оптических характеристик аэрозольной тропосферы и закономерности структуры вертикального профиля, полученные в центральной части ЕТР над однородной континентальной поверхностью, которые верифицированы и нашли подтверждение в других географических районах, (аридной зоне, над Тихим океаном, над неоднородной поверхностью суша-море, над городом – пригородом), а также при сравнении результатов измерения аэрозольных характеристик тропосферы и стратосферы.

3. Модель (схема) краткосрочного прогноза вертикального дневного профиля $\mu_a(h, \lambda)$, разработанная с учетом динамики термобарического поля слоя свободной атмосферы и высоты ППС с погрешностью $\pm 0,3 \text{ км}$.

4. Методика инженерного расчета оптических величин с повышенной точностью по разработанной динамической модели. Данная методика исключает неконтролируемые вариации оптической плотности атмосферы характерные для долгосрочного прогноза ППС и осреднения данных по сезонно-климатическому принципу.

Апробация результатов

Основные результаты исследований докладывались на Всесоюзных симпозиумах по распространению лазерного излучения в атмосфере (Томск, 1981, 1983, 1986, Красноярск 1987), Всесоюзных симпозиумах по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Томск, 1980, 1982, 1984, г.Туапсе 1986 г.), Всесоюзном совещании по распространению лазерного излучения в дисперсных средах (Обнинск, 1988), Всесоюзной конференции «Теоретические и экспериментальные исследования оптически-активных компонент атмосферы» (Ленинград-Выборг, 1988), XIII International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics», (Toms, 2006).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 17 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах и в сборниках научных трудов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка литературы из 191 наименований, списка публикаций. Работа содержит 170 стр. машинописного текста, в том числе 35 рисунков и 13 таблиц.

Личный вклад автора

Автором выполнена основная часть исследований – постановка отдельных задач выполненной программы работ, разработка и аттестация аппаратуры, методики экспериментов, организация и проведение летных экспедиций в составе экипажа, проведение измерений, обработка и анализ данных, интерпретация полученных результатов и их обобщение. Соавторами выполнена часть работ, связанная с проведением экспериментов, обработкой и анализом полученных данных.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проанализированы история и состояние вопроса, сформулированы основные задачи исследования, обосновывается достоверность полученных результатов, научная новизна и практическая значимость положений, выносимых на защиту.

В первой главе рассмотрены методология и конкретизированы задачи исследования. Формулируются прогностические взаимосвязи, подлежащие подтверждению в натурном эксперименте. Задачи решаются в соответствии с современными представлениями о физике и динамике атмосферы, а также

механизма взаимодействия оптического излучения с диспергированным веществом и теории переноса оптического излучения в рассеивающей среде. Формулируются требования к измерительной оптико-электронной аппаратуре, методике и точности анализа прозрачности атмосферы в условиях слоисто неоднородной стратификации. Основой методологического подхода служит физически обоснованное положение о тесной связи оптических и метеорологических величин как консервативных характеристиках воздушной массы при низкой относительной влажности (менее 60%). Физической основой методики для анализа и обобщений характеристик пограничного слоя является известное положение о доминирующей роли турбулентности и вертикальных движений в условиях бароклинной атмосферы и гипотеза о возможном существовании взаимосвязанной системы физических параметров по вертикали для слоисто стратифицированной атмосферы. Показано, что результаты диагностики характеристик атмосферы могут быть представлены в виде эмпирических коэффициентов связи как реперных точек в прогнозируемой функциональной зависимости между оптическими и метеорологическими параметрами для контролируемых условий погоды. Показано, что достоверность результатов обеспечивается применением физически обоснованного методологического подхода к анализу атмосферных процессов, а также используемого экспериментального оптико-физического метода исследований, который базируется на способе получения в открытом воздушном пространстве, на разных высотах наиболее точных эмпирических данных (с минимумом априорных допущений) по принципу прямых локально-оптических измерений в слое воздуха *in situ* с борта самолета, при одновременном системном анализе макромасштабных синоптических процессов в окружающей атмосфере. В выводах к первой главе обозначен перечень ожидаемых конечных результатов исследований и основных параметров средств контроля атмосферы.

Вторая глава посвящена аппаратурным и методическим аспектам выполненного исследования. В ней сформулированы требования и принятые технические решения. Показана целесообразность и оптимальность реализации приборного комплекса в составе нефелометра и лидара. Обоснован спектрально-нефелометрический метод зондирования под углом 45° . Рассмотрены вопросы, обеспечивающие достижение высокого энергетического потенциала нефелометра и фотометрического контраста в его измерительном объеме, что позволило проводить измерения характеристик аэрозольного светорассеяния в открытом объеме пространства, (в том числе в «чистой атмосфере») в дневное время суток. Разработаны методы и средства градуировки для метрологической аттестации нефелометра. Предложена и реализована оптическая схема нефелометра «Угол» (Рис.1) с импульсным излучателем высокой яркости (1), в геометрии кольцевой схемы прибора с широкоугольным объективом (2) в канале излучателя и узким полем зрения в канале фотоприемника (11). Это позволяет реализовать высокий энергетический потенциал оптической системы и точность измерений с миними-

зацией величины фоновой засветки фотоприемника с высоким контрастом. Расчет оптической схемы прибора рассматривается в приближении контраста яркости с учетом оптических характеристик излучения по признакам интенсивности и её распределения в телесном угле для каналов излучателя и фотоприемника. Разработан вариант схемы спектральной калибровки прибора с неселективным зеркальным рассеивателем (16) и ослабителем (24). Предложена аналитическая формула для расчета габаритов нефелометра 45° в приближении геометрической оптики с оптимизацией оптической схемы одновременно по двум признакам: минимальных габаритов и минимальных значений фоновой засветки от внутреннего источника излучения. Рассматривается также широкоугольный вариант интегрального нефелометра с кольцевой схемой осевой симметрии (в которой повышен энергетический потенциал по сравнению с геометрией линзового интегрального нефелометра боковой симметрии) и типовой геометрией безлинзового интегрального нефелометра боковой симметрии.

Предложенная методика обработки измеренного сигнала с его декомпозицией в виде многопотокowego приближения. Она позволяет реализовать достоверность и точность анализа аэрозольного компонента при высокой прозрачности атмосферы на уровне пороговых значений чувствительности, зафиксировать параметры прибора в статических условиях применения и экстраполировать их на динамические условия применения при внешних воздействиях переменных значений температуры, давления, скорости потока воздуха в широком диапазоне их вариаций и градиентов.

Показано, что вносимая дополнительная погрешность измерений, связанная с влиянием дестабилизирующих факторов температуры и скорости воздушного потока, не превышает допустимого предела случайной погрешности метода измерений.

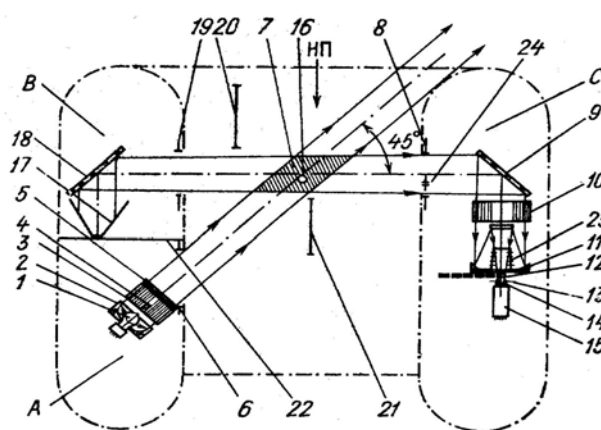


Рис.1 Оптическая схема спектрального нефелометра «Угол». 3, 10 – со-
товая бленда, 23 – коническая бленда,
12 – светофильтры, 15 – ФЭУ.

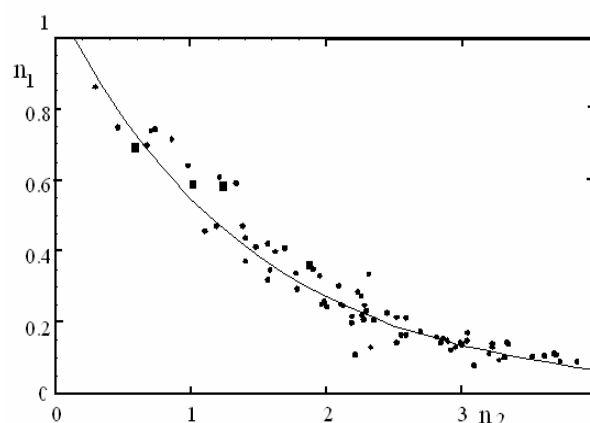


Рис.2 Взаимосвязь параметров фор-
мулы Ангстрема ($\sim n_1 \lambda^{-n_2}$), определённая по

методу $\varphi=45^\circ$ (■), и по методу про-
зрачности $\varphi=0^\circ$ (●) (В.Л. Филиппов).

Таким образом, в спектральном нефелометре «Угол» реализованы следующие технические характеристики:

- порог измерения прибора по объёмному показателю рассеяния $\Delta P(\lambda_0)=0,00015 \text{ км}^{-1}$, при $\Delta\lambda_0=10 \text{ нм}$, и отношении С/Ш=3;
- динамический диапазон, не менее 1000;
- относительная погрешность измерений $\pm 15\%$;
- постоянная времени – 0,4 с;
- средний фотометрический контраст – $B/\Delta B=10^2$.

При рассмотрении вопросов качества, достоверности и точности нефелометрического анализа аэрозольной атмосферы установлено, что приведённая совокупность характеристик нефелометра «Угол» имеет достаточно высокие показатели, которые ранее считались недостижимыми.

Предложен и реализован метод интерпретации результатов спектральных нефелометрических измерений в видимой и ближней ИК области спектра, а также метод и средства градуировки прибора по величине молекулярного рассеяния излучения в атмосфере чистых газов. Достоверность градуировки подтверждена и контролируется тремя независимыми методами. Доверительная погрешность результата градуировки не превышает $\pm 5\%$ при доверительной вероятности $P=0,96$. Что соответствует метрологическим требованиям о передаче размера единиц меры ($\pm 1\%$) от образцовых средств измерений к рабочим.

Спектральный нефелометр «Угол» отнесен к нестандартным средствам измерений, прошёл метрологическую аттестацию в установленном порядке и аттестован по данной категории. Контроль метрологических характеристик прибора в процессе эксплуатации, осуществляется дистанционно и оперативно по встроенному калибратору (16,24 рис.1) наряду со статическим наземным контролем характеристик прибора по газам и по диффузному экрану. Обсуждаются источники погрешностей, даны оценки аттестуемых параметров спектрального нефелометра «Угол» в сравнении с известными отечественными и зарубежными аналогами. Приводятся характеристики самолетного лидара «Нева» с обзором вниз, как адаптированный вариант квантового дальномера. В выводах к главе сформулированы основные технические характеристики разработанного комплекса приборов.

Третья глава посвящена обсуждению основных экспериментальных результатов выполненного исследования над континентом в фоновых условиях Подмосковья для 38 различных дней во все сезоны года. Данные результаты верифицированы и дополнены результатами 60 полетов в отдельных экспедициях в Крыму, в Поволжье (Казань), в аридном районе (Алма-Ата) и на Дальнем Востоке, Полученная совокупность результатов исследований служит исходным материалом для формирования динамической модели краткосрочного прогноза профиля $\mu_a(h)$ в слоисто-однородной атмосфере.

Четвертая глава посвящена описанию динамической модели вертикального профиля. При выборе входных параметров модели основное внимание обращалось на доминантную роль выбранных физических процессов

атмосферы и установленных в качестве предикторов, в числе которых турбулентный перенос аэрозольной субстанции, а также скорость и направление ($\omega = \pm 0,02$ м/с) упорядоченного вертикального движения воздуха синоптического масштаба разных барических систем (Рис.3).

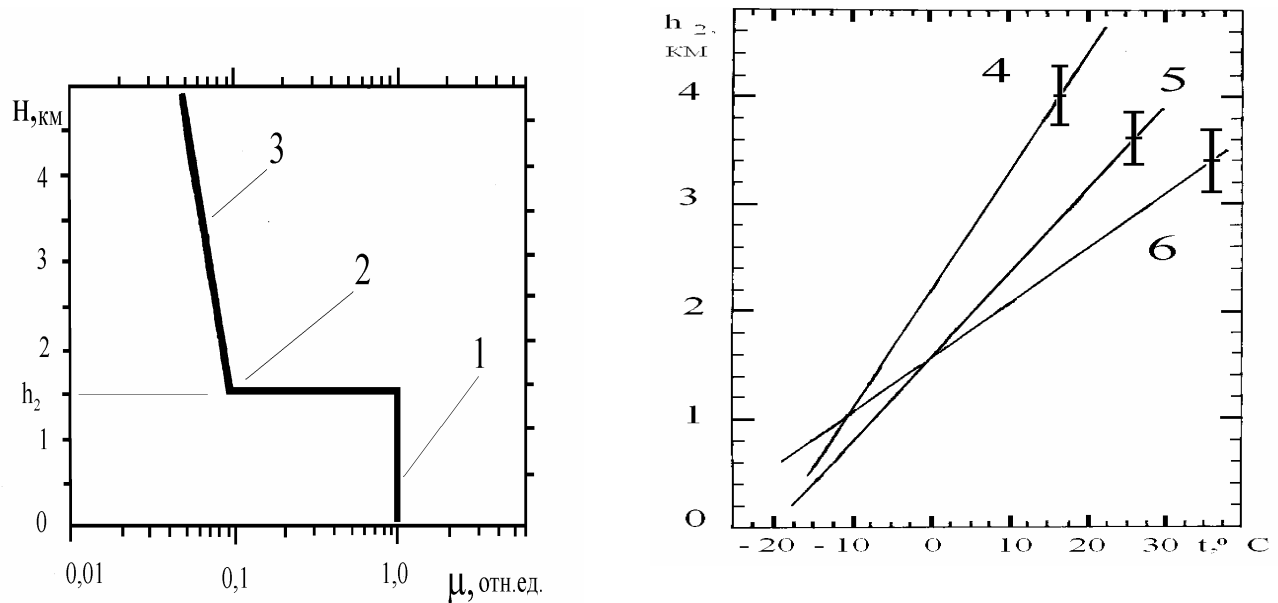


Рис. 3 Динамическая модель вертикального профиля $\mu_a(H, \omega)$.

1 – пограничный слой на высоте h_2 ; 2, 3 – характеристики слоя свободной атмосферы; температурная зависимость высоты h_2 для вертикальной скорости ω барической системы циклона – 4, промежуточного поля – 5 и антициклона – 6.

Действие данных механизмов переноса идентифицируются путем измерения следующих величин: приземной средней дневной (суточной) температуры $\pm t$ с учётом знака, формы и направления кривизны изобар на изобарической поверхности 700 мб и 500 мб. Данные метеорологические величины могут быть легко измерены на сетевых станциях метеорологических наблюдений, а также дополнены оптическими измерениями показателя рассеяния и показателя Ангстрема. Разработана динамическая модель и алгоритм расчета следующих оптических параметров:

1. $\mu_a(h_2) = \mu_a(h_0)$, h_0 – приземный слой;
2. $\mu_a(h_c^*)/\mu_a(h_2) = 0,12 \pm 0,07$, h_c^* – нижняя граница свободной атмосферы;
3. $\mu_a(h_c) = \mu_a(h_c^*) \exp(-z/\zeta_a)$, для $h_t > z > h_2$; $\zeta_a = 5 \pm 1$; h_t – тропопауза;
4. $\mu_a(h_5)_{cp} = <0,010> \pm 0,001 \text{ км}^{-1}$, $h_5 = 5 \text{ км}$;
- 4.1 $\mu_a(h_5) = 0,005 \pm 0,001 \text{ км}^{-1}$, для массы МАВ
- 4.2 $\mu_a(h_5) = 0,013 \pm 0,001 \text{ км}^{-1}$, для массы МУВ
5. $h_2(t, \omega) = (a t + b) \text{ км}$, для $+30^\circ\text{C} > \pm t > -20^\circ\text{C}$, $\delta h_2(\pm t, \omega) = \pm 0,3 \text{ км}$;
- $a_1 = 0,10$; $b_1 = 1,6$; для $\omega_1 = +0,02$ м/с, циклон;
- $a_2 = 0,08$; $b_2 = 1,6$; для $\omega_2 = \pm 0,01$ м/с, промежуточное поле;
- $a_3 = 0,04$; $b_3 = 1,4$; для $\omega_3 = -0,02$ м/с, антициклон.
- $a_4 = 0,08$; $b_4 = 1,8$; $\delta h_2(\pm t) = \pm 0,6 \text{ км}$, с учетом только температуры.

6. $\mu_a(\lambda) = \mu_a(\lambda_0) n_1 \lambda^{-n_2}$;
- 6.1 $n_1 = \exp(-0,7 n_2)$, $\delta n_1 = \pm 5\%$;
- 6.2 $n_2(45^\circ) \in 0-4$; для $\varphi = 45^\circ$;
- 6.3 $n_2(0^\circ) \in 0-2$; для $\varphi = 0^\circ$;
- 6.4 $n_2(0^\circ) \approx 0,5 n_2(45^\circ)$;
- 6.5 $n_2(h_0) = n_2(h_2) = n_2(h_c) = \underline{n_2(h)}_{\text{ср.}}$.

Данная динамическая модель позволяет восстановить вертикальный профиль показателя рассеяния $\mu_a(h, \lambda)$ по схеме рис.3 для климатической зоны средней географической широты с использованием типовой метеорологической информации и основных связей. Погрешность краткосрочного прогноза высоты ППС составляет $\pm 0,3$ км, что в два раза меньше, чем погрешность по методу прогноза, основанного на сезонном принципе учета динамики высоты ППС ($\pm 0,6$ км).

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации

1. Проведены самолетные нефелометрические исследования тропосферы на основе специально разработанной нефелометрической аппаратуры и метода.

2. В результате выполненных исследований получены характеристики и функциональные зависимости, которые описывают параметры разработанной динамической модели.

3. На основе предложенной динамической модели разработана инженерная методика расчета наклонной прозрачности атмосферы с повышенной точностью результатов. Данная методика исключает неконтролируемые вариации оптической плотности атмосферы, характерные для долгосрочного прогноза ППС и осреднения данных по сезонно-климатическому принципу.

Проведённые натурные спектрально-нефелометрические исследования оптических характеристик тропосферного аэрозоля подтвердили теоретические ожидания, исходящие из основных положений физики атмосферы. Предложенная аналитическая форма и алгоритм для моделирования вертикального профиля и высоты пограничного слоя на основе выбранных предикторов позволяют связать структуру вертикального профиля аэрозоля, определенного оптическим методом спектральной нефелометрии со стандартными метеорологическими и оптическими величинами приземного слоя атмосферы в виде инженерной методики. В итоге сложилась завершённая концепция, которая оказалась плодотворной при решении проблемы повышенной точности диагноза и прогноза наклонной прозрачности атмосферы в задаче видения объектов для условий оптической погоды со слоистой стратификацией тропосферного аэрозоля.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Максимюк В.С., Филиппов В.Л. Самолетные исследования динамики аэрозоля, определяющей изменчивость оптической погоды // Оптический журнал. 2007, №1, с.50-54.
2. Maksimiyuk V.S., Philippov V.L. Airplane research of a vertical structure of concentration and disperse structure of troposphere aerosol in the interest of problems of vision in an atmosphere // Proc. SPIE, The International Society for Optical Engineering . 2006, vol. 6522, № 11, 652222.
3. Maksimiyuk V.S. Airplane Researches of a Vertical Concentration Structure and Disperse Structure of Troposphere Aerosol in the Interests of Problems of Vision in an Atmosphere // XIII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics". Abstracts.-Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2006, p.170...171.
4. Maksimiyuk V.S. Angular Dependence of Angstrom Parameter for Junge Distributions // XIII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics". Abstracts.-Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2006, p.131...132.
5. Максимюк В.С., Филиппов В.Л. Измерительная аппаратура и результаты исследований пространственно-временной структуры аэрозоля в различных климатических районах // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. Казань: «Новое знание». 2005. Выпуск 2(43). С.33-46.
6. Максимюк В.С., Файзрахманова Г.Ф. Пространственная структура показателя аэрозольного ослабления над Алма-Атой по данным нефелометрических измерений с борта самолета-лаборатории // Исследование загрязнения атмосферы Алма-Аты. Часть 1. Эксперимент АН-ЗАГ-87. Алма-Ата: Гылым, 1990. с.93-101.
7. Максимюк В.С., Татьяна С.В. Анализ количественных данных показателя аэрозольного ослабления тропосферы и стратосферы в подспутниковом эксперименте // Оптика атмосферы. 1989. Т.2. №8. С.891–893.
8. Герасимов А.В., Максимюк В.С., Татьяна С.В. О влиянии метеорологических характеристик на определение толщины пограничного слоя атмосферы методами оптического зондирования // Метеорология и гидрология. 1988. № 2. С.25-33
9. Максимюк В.С., Татьяна С.В. Модельные представления о структуре вертикального распределения тропосферного аэрозоля по данным нефелометрического и лазерного зондирования с борта самолета-лаборатории // Оптические свойства земной атмосферы. Сборник научных трудов ТФ СО АН СССР Томск, 1988, с.41-44.
10. Максимюк В.С., Танташев М.В., Семенов Л.С. Многоканальный нефелометр для определения спектральной прозрачности атмосферы с

борта самолета. – Оптико-механическая промышленность, 1987, №6, с.20-22.

- 11.Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянан С.В. Экспериментальные исследования наклонной прозрачности с помощью самолетного нефелометра и лидара // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по авиационной метеорологии. Москва. 1986. С. 152.
- 12.Максимюк В. С., Танташев М.В., Татьянан С.В. Оптический комплекс для исследования вертикальной структуры тропосферного аэрозоля // Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Тезисы докладов, Часть III. Томск, 1986, с.211-215.
- 13.Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянан С.В. Показатель аэрозольного ослабления тропосферы по данным нефелометрического зондирования с борта самолета -лаборатории. – Тезисы докладов VIII Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, Часть 1, Томск, 1986, с.67-71.
- 14.Максимюк В.С., Татьянан С.В., Царевская Р.А. Вариации показателя Ангстрема для аэрозольного ослабления в тропосфере по данным нефелометрического зондирования с борта самолета лаборатории // 111 Всесоюзное совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. Тез. докл. Ч.1. Обнинск, 1985, с.79-82.
- 15.Козлов С.Д., Макаров А.С., Максимюк В.С., Татьянан С.В., Топорков Ю.Г. Синхронные исследования ослабляющих рассеивающих и поглощающих характеристик аэрозольной атмосферы промышленного района горно-долинной местности // III Всесоюзное совещание по атмосферной оптике и актинометрии. Тезисы докладов. Ч.1, Томск, 1983. С.22-23.
- 16.Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянан С.В. Исследование пространственной структуры оптических характеристик атмосферы над сушей и морем // Тезисы докладов VI Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, Часть 1, Томск, 1981, с. 52-55.
- 17.Максимюк В.С., Танташев М.В., Татьянан С.В. О горизонтальной однородности плотности аэрозоля в нижней тропосфере // Тезисы докладов VI Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы, Часть 1, Томск, 1980, с. 54-55